第46卷　第1期
2023年1月
干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY
Vol. 46　No. 1
Jan. 2023

RegCM4.6两种积云参数化方案在东亚模拟结果的评估

刘　鑫[1]，亢燕铭[1]，辛　渝[2]，陈勇航[1]，周海江[1]，秦　汉[1]，
何　清[2]，王智敏[3]

（1. 东华大学环境科学与工程学院，上海　201620；2. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所，
新疆 乌鲁木齐　830002；3. 新疆维吾尔自治区人工影响天气办公室，新疆 乌鲁木齐　830002）

摘　要：新一代区域气候模式RegCM4.6引进了Mix积云参数化方案，可以将之前版本中的Emanuel和Grell方案结合在一起，以弥补单个参数化方案的不足。利用2016年MODIS（Moderate-resolution imaging spectroradiometer）数据对RegCM4.6中Mix和Emanuel积云参数化方案模拟的东亚云量（Cloud fraction，CF）、冰水柱含量（Ice water path，IWP）和液水柱含量（Liquid water path，LWP）进行初步评估，计算了相关系数（*r*）、平均绝对误差（Mean absolute error，MAE）、平均偏差（Mean bias error，MBE）和均方根误差（Root mean square error，RMSE），以便为相关研究选取积云参数化方案提供参考依据。结果表明：（1）模拟的CF的MBE大致以胡焕庸线为界，西北部为轻微高估，东南部通常为低估。2种方案在夏季的模拟效果最好，冬季最差。Mix方案的MAE、MBE和RMSE的绝对值在四季普遍小于Emanuel方案。（2）模式明显低估了东亚的IWP，除夏季外，2种方案模拟的IWP与MODIS的都呈显著负相关，表明模式难以准确模拟出云中冰晶相关的物理过程。（3）2种方案模拟的LWP在青藏高原和东部海域均为低估，在中国南部、中部和北部为高估，但Mix方案的偏差更接近于0。冬季，2种方案的评估参数相近，其他季节Mix方案的MAE、MBE和RMSE的绝对值均小于Emanuel方案，其中MAE相差21~39 g·m^{-2}。因此，Mix方案更适用于在东亚进行云水资源方面的模拟研究。

关 键 词：区域气候模式；东亚；云量；冰水柱含量；液水柱含量
文章编号：1000－6060(2023)01－0023－13(0023～0035)

东亚是世界上地表淡水资源最贫乏的地区之一，随着人工增水技术的发展，开发利用空中云水资源已成为目前缓解水资源短缺的途径之一[1-2]，因此，对于云水资源的评估和预测也就尤为迫切。云的形成与分布是大气各种热力、动力过程和地表过程共同作用的结果[3]。目前，已有很多学者利用地面观测和卫星反演的云资料，分析不同地区的云量、云等效温度和冰水柱含量等物理属性的时空分布及其与降水的关系[4-8]。但地面站点分布不均，极轨卫星的观测时间对于任何给定的区域都是不连续的，地球静止卫星数据受限于观测范围，因此要进一步评估和预测云水资源还需要借助数值模式[9]。

区域气候模式（Regional climate model，RegCM）可用于区域层面上的气候摸拟和预测[10-14]，其中积云对流是云水数值模拟和预报中最常采用的参数化方案。基于之前RegCM版本的研究表明，Emanuel、Grell和Kuo积云参数化方案模拟的温度效果较好，而降水有较大偏差[15-16]，其中Emanuel方案对东亚气温和降水的模拟效果总体表现更好[17-18]。但RegCM4.6的用户手册指出，Emanuel方案倾向于在陆地上产生过多的降水，特别是发生非常强的降水个例时，而Grell方案倾向于在热带海洋上产生过少的降水[19]。因此，新一代区域气候模式RegCM4.6将Grell和Emanuel方案结合到一起，引入了Mix方案，

收稿日期：2022-05-10；　**修订日期：**2022-06-28
基金项目：国家自然科学基金项目(42030612,41675026,41375021)资助
作者简介：刘鑫(1995-)，女，博士研究生，主要从事能源环境与卫星遥感等方面的研究. E-mail: xinliu@mail.dhu.edu.cn
通讯作者：陈勇航(1965-)，女，博士，教授，主要从事环境与资源遥感等方面的研究. E-mail: yonghangchen@dhu.edu.cn

可以在陆地和海洋使用不同的积云参数化方案[20]，然而目前鲜有基于这2种积云参数化方案对云物理属性的模拟效果进行评估的研究。因此，本文基于RegCM4.6分别运用Emanuel和Mix积云参数化方案进行模拟，并使用MODIS卫星产品对模拟的云量(Cloud fraction，CF)、冰水柱含量(Ice water path，IWP)和液水柱含量(Liquid water path，LWP)进行评估，以探究两者在东亚的适用性，以期为东亚及其周边区域云水资源的开发利用和预测研究提供参考依据。

1 研究区概况

东亚总面积约1250×10⁴ km²，包括中国、蒙古、日本、韩国和朝鲜5个国家，地形复杂，地势起伏大。西部有青藏高原，属于高地气候；西北内陆地区少雨干燥，属于干旱、半干旱区域，东部面临太平洋，较大的海陆热力差异形成了典型的季风气候。根据气候特征，参照《中国自然地理》(1995年)[21]将东亚划分为5个子区，共6个研究区域，包括整个东亚、西北区、青藏高原、北区、南区和东部海域(图1)，以便研究Emanuel和Mix积云参数化方案的适用性。

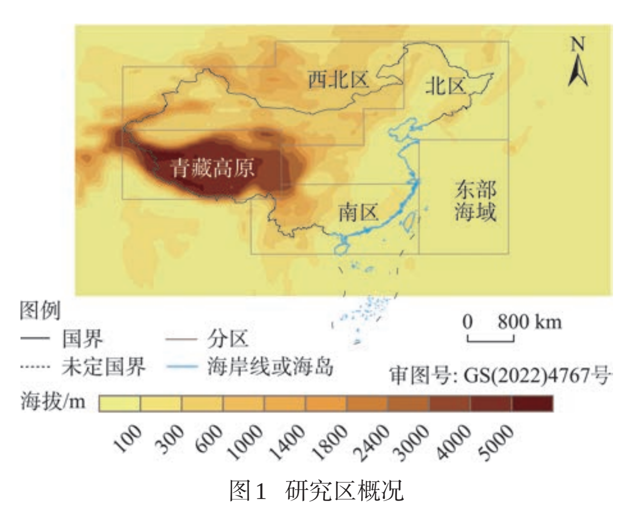


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

2 数据与方法

2.1 数据来源

中分辨率成像光谱仪(Moderate-resolution imaging spectroradiometer，MODIS)是搭载在Terra和Aqua卫星上的一种被动辐射计，具有多通道、高时间分辨率和覆盖范围广的特点。本文使用MODIS的Level 3数据MOD08_M3和MYD08_M3，其时间分辨率为月，空间分辨率为1°×1°。Li等[22]利用地面站点的全天空成像仪观测数据对MODIS反演的白天CF进行验证，结果表明在大多数情况下，两者的CF具有较好的一致性。King等[23]的研究指出MODIS的云掩膜和云属性数据非常稳定和可靠，因此本文采用MODIS反演的CF、IWP和LWP来评估模拟结果。

2.2 研究方法

2.2.1 RegCM4.6模式介绍及设置 自1989年，美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research，NCAR)开发了RegCMs(Regional climate models)，后由国际理论物理中心(International Centre for Theoretical Physics，ICTP)改进。本研究采用RegCM4.6版本，设计2种试验方案，除积云参数化方案不同外，其他设置均相同。试验1的积云参数化方案选用Mix方案，即在海洋上为Emanuel方案，陆地上为Grell方案；试验2在陆地和海洋均为Emanuel方案。关于Emanuel和Grell方案的详细描述可参考文献[19-20,24-25]。

模拟区域包括整个东亚(37°~158°E，10°~58°N)，中心位于(38°E，98°N)，水平分辨率为25 km，格点数为330(经向)×170(纬向)。积分时间为2015年12月1日至2016年12月31日，其中第一个月作为模式的初始化时间不予讨论。模式的初始场和侧边界条件由ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)再分析数据提供，海温采用OISST(Optimum interpolation sea surface temperature)数据集，地形采用GMTED(Global multi-resolution terrain elevation data)数据。主要的参数化方案包括：BATS(Biosphere-atmosphere transfer scheme)陆面方案、Explicit Moisture大尺度降水方案、Holtslag PBL行星边界层方案、Zeng海洋通量方案及CCM3(Community climate model version 3)辐射传输方案。

2.2.2 统计量计算 虽然卫星反演资料存在一定的误差，但由于目前技术条件受限制而严重缺乏云物理属性观测资料的情况下，本文分别将2种试验模拟结果和MODIS数据的CF、IWP和LWP按1°×1°的网格进行年和季节平均，再分别与卫星的同一个格点作差值，得到偏差空间分布，按划分区域进行平

均得到区域平均偏差。为进一步评估哪种方案的模拟效果更好，计算了相关系数(r)、平均绝对误差(Mean absolute error，MAE)、平均偏差(Mean bias error，MBE)和均方根误差(Root mean square error，RMSE)，计算公式如下：

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{n}[\mathrm{Model}(i)-\overline{\mathrm{Model}}][\mathrm{MODIS}(i)-\overline{\mathrm{MODIS}}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}[\mathrm{Model}(i)-\overline{\mathrm{Model}}]^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}[\mathrm{MODIS}(i)-\overline{\mathrm{MODIS}}]^2}} \tag{1}$$

$$\mathrm{MAE}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|\mathrm{Model}(i)-\mathrm{MODIS}(i)| \tag{2}$$

$$\mathrm{MBE}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\mathrm{Model}(i)-\mathrm{MODIS}(i) \tag{3}$$

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}[\mathrm{Model}(i)-\mathrm{MODIS}(i)]^2} \tag{4}$$

式中：n为格点数；Model(i)和$\overline{\mathrm{Model}}$分别为模式模拟所得的物理量及其平均值；MODIS(i)和$\overline{\mathrm{MODIS}}$分别为由MODIS数据所得的物理量及其平均值。

3 结果与分析

3.1 年平均云量、冰水柱含量和液水柱含量

采用MODIS资料对模拟的CF、IWP和LWP的年平均分布进行评估(图2)。年平均CF在西北区和青藏高原通常低于0.5，在北区、东部海域和南区高于0.6。Emanuel和Mix方案的CF的MBE空间分布相似，均明显低估了北区沿海一带、东部海域和南区的CF，这与韩振宇等[26]的研究结果一致；在西北区中部和青藏高原区中部出现约为0.1的高估；在蒙古、新疆、内蒙古、青海和西藏地区的MBE基本在±0.1以内。

年平均IWP空间分布的高值区在东南沿海附近，超过400 g·m^{-2}；西北区、青藏高原和北区的普遍小于300 g·m^{-2}。2种方案均明显低估了东亚的IWP，特别是在中国东南部和东部海域，低估达250 g·m^{-2}；在西北区的模拟效果稍好，低估在150 g·m^{-2}以内。

年平均LWP在中国东南部为200~240 g·m^{-2}，西北区南部一般小于120 g·m^{-2}。2种方案的MBE在北区和南区均为正，且Emanuel方案的更大；在青藏高原和东部海域约为−50~−150 g·m^{-2}；在西北区基本在±50 g·m^{-2}以内。

Emanuel方案在陆地上高估CF和LWP的面积比Mix方案更大，因为Emanuel方案考虑了云内云水向雨水或者冰晶的自动转化，假设云层中部浮力大于底部时发生对流，混合卷入云浮力梯度函数，这种情况往往会高估陆地上的积云和对流降水[27]。2种方案在陆地上分别为Emanuel和Grell，在海洋上均为Emanuel，陆地上使用不同的积云参数化方案会导致陆地上云的形成、水汽输送和降雨过程等产生差异，而陆地上的这些差异会通过地气系统的辐射、对流运动、局部扰动、海陆相互作用等从而影响海洋上的CF、LWP和IWP等，使得海洋上的模拟结果也存在差异[28]。

与MODIS数据比较得到Emanuel和Mix方案模拟的CF、IWP和LWP在不同区域的MBE(图3)。对CF而言，2种方案的MBE在东亚为负，在西北区、北区和青藏高原接近，而在南区和东部海域Mix方案比Emanuel方案的MBE大约0.05。

对IWP而言，2种方案在5个子区均为低估，南区和东部海域的MBE约为−260 g·m^{-2}。在西北区、北区和青藏高原，Emanuel方案的MBE比Mix方案的大约25 g·m^{-2}。

Emanuel方案的LWP在整个东亚的MBE接近0，结合图2h可知，这主要是由于正负MBE相互抵消。在西北区，Emanuel方案的MBE为正，而Mix方案的MBE为负，且两者的绝对值都小于50 g·m^{-2}。在青藏高原区，2种方案的MBE均为负；在北区和东部海域，Mix方案的模拟效果明显优于Emanuel方案；在南区两者的MBE均为正且小于25 g·m^{-2}。

表1给出了Emanuel和Mix方案对CF、IWP和LWP模拟结果的统计量，可以看出2种方案都低估了CF，但Mix方案的r更高，且MAE、MBE和RMSE也更接近于0。2种方案均严重低估了IWP，且r小于0，结合图2和图3可知，IWP的误差受积云对流方案的影响较小。2种方案的LWP的r相近，但Mix方案的MAE和RMSE都更小。

3.2 季节平均云量

在分析了MBE空间分布的基础上，进一步对Emanuel和Mix方案模拟的CF季节MBE进行探究(图4)。春、秋季和冬季东亚的CF均呈现“西北少东南多”的特征，低值区为西北区和青藏高原，高值区为北区、南区和东部海域，主要由于以上区域的大气湿润度较高，水汽聚集为低云的形成提供了条

注：Emanuel-MODIS为Emanuel与MODIS的差值；Mix-MODIS为Mix与MODIS的差值；CF为东亚云量；IWP为冰水柱含量；LWP为液水柱含量；MBE为平均偏差。下同。

图2 年平均CF、IWP和LWP及其MBE的空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of annual mean CF, IWP, LWP and MBE

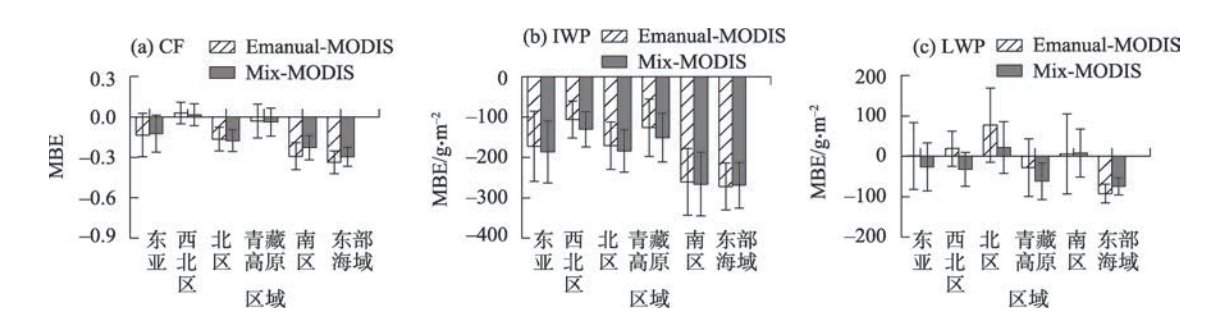


图3 CF、IWP和LWP不同区域的MBE

Fig. 3 MBE of CF, IWP and LWP in different regions

件，并且低温阻止水汽向高空输送[29]，这与前人的研究结果[30-31]一致。夏季的CF呈"西北少、西南多"的态势。对于中国东部而言，夏季的CF模拟效果优于冬季，这与韩振宇等[26]的研究结论类似。相同季节，2种方案的MBE空间分布相似，在CF较高的地区模式低估越严重，在CF为0.4~0.6时的MBE接近于0，

表1　Emanuel和Mix方案在东亚的模拟结果的年平均统计量

Tab. 1　Annual averaged statistics of simulation results from Emanuel and Mix schemes in East Asia

物理量	Emanuel方案				Mix方案			
	r	MAE	MBE	RMSE	*r*	MAE	MBE	RMSE
CF	0.013	0.172	−0.135	0.210	0.152*	0.155	−0.125	0.186
IWP/g·m^{-2}	−0.272*	172	−172	193	−0.160*	187	−187	202
LWP/g·m^{-2}	0.519*	67	1	83	0.476*	54	−27	65

注：*表示通过95%显著性检验；CF为云量；IWP为冰水柱含量；LWP为液水柱含量；*r*为相关系数；MAE为平均绝对误差；MBE为平均偏差；RMSE为均方根误差。下同。

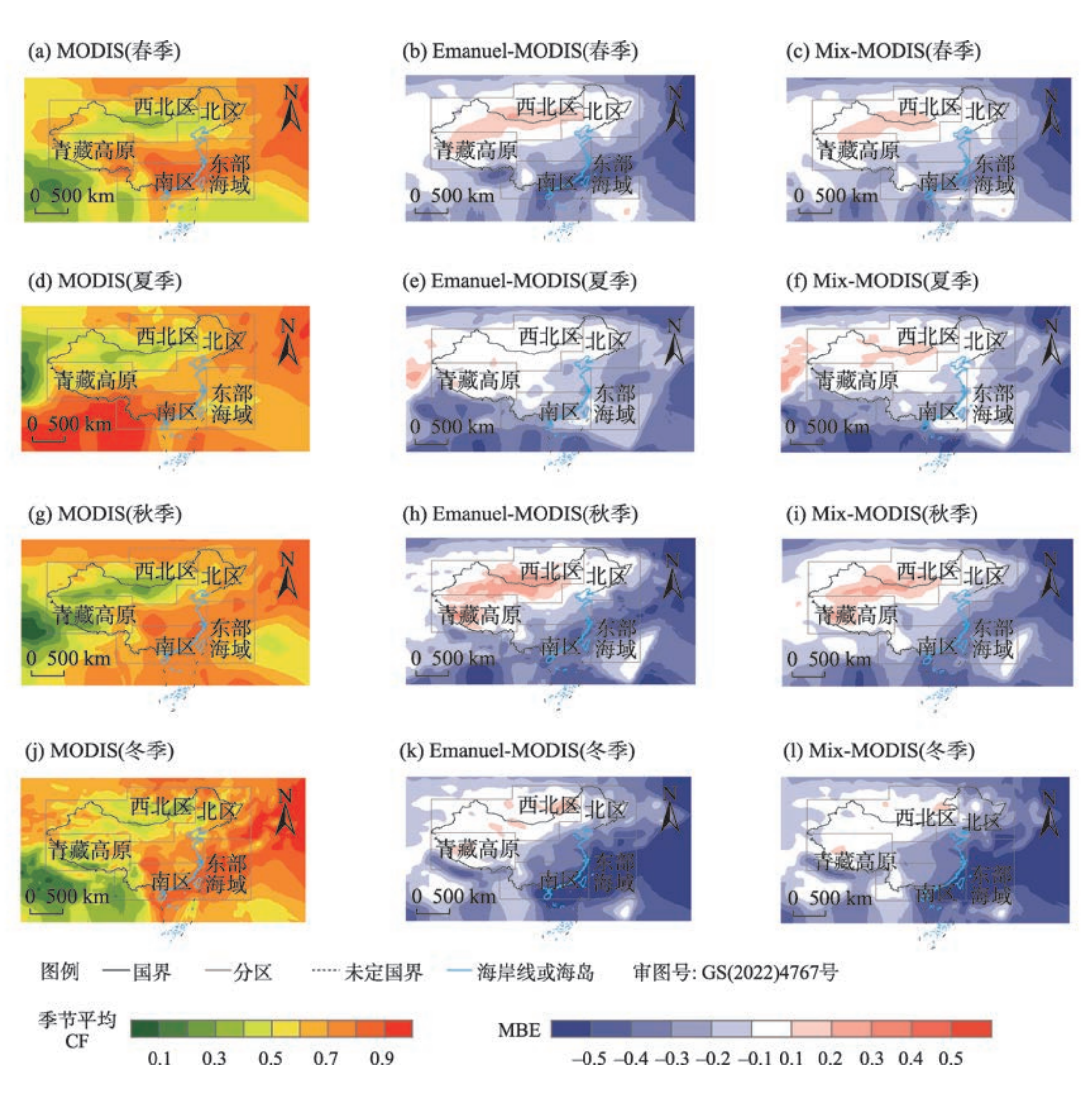


图4　不同季节CF及其MBE的空间分布

Fig. 4　Spatial distributions of CF and MBE in different seasons

在CF<0.4时可能会出现高估，如西北区和青藏高原，而在北区、南区和东部海域出现严重低估。春季，模拟的CF在东部海域的南部有一处MBE为±0.1的区域，结合MODIS的CF分布可知，该区域的CF为0.4~0.6，其相对偏差在20%左右。

模式模拟的CF在中国东南沿海和东部海域出现明显的系统性低估。这些区域在模拟范围的边缘，海洋-陆地-大气的相互作用较为复杂，给出的侧边界条件可能不够充分。另外，在气候系统中存在积云过程、海洋过程、辐射过程和陆面过程等物

理过程复杂的相互作用，而在模式中没有使用海气耦合，故无法真实反映积云对流与海洋过程之间相互作用的本质[32]。模拟的地面气温相对于观测资料在东亚区域的大部分陆地上都是冷偏差，但在中国西北地区出现高于1 ℃的正偏差[33-34]，这与本文CF的MBE空间分布较为吻合，说明模拟的地表气温偏高或偏低会影响上空的水汽输送，从而导致高估或低估CF。

根据CF在不同区域、不同季节的MBE（图5）可知，2种方案都低估了东亚四季的CF。相同季节，MBE在西北区和青藏高原均在±0.1以内，模拟效果明显优于其他3个子区；东部海域的MBE均为负且最小，其次是南区。各季节中，冬季的MBE都为负，且模拟效果最差。在西北区、北区和青藏高原区，2种方案的模拟效果相当；而在南区和东部海域，Mix方案的模拟效果通常优于Emanuel方案。

表2给出了2种方案模拟的CF相对于MODIS的季节平均统计量，可以看出夏季的模拟效果最好，冬季的最差。不管在哪个季节，2种方案都低估了CF，且Emanuel方案的MAE、MBE和RMSE的绝对值普遍大于Mix方案。结合图4可知，秋季的CF相对较小，而Emanuel方案考虑了云内云水向雨水或冰晶的自动转换，从而易高估陆地上积云[27]，因此Mix的r在秋季比Emanuel的大0.117，而2种方案在其他季节的r相差不超过0.05。

3.3 季节平均冰水柱含量

根据Emanuel和Mix方案模拟的IWP的季节评估（图6）可知，春、秋季和冬季的IWP空间分布在东亚呈现出“西北低、东南高”的态势，高值区为南区东部和东部海域，超过400 g·m^{-2}。2种方案对IWP的模拟在高值区的MBE可达−300 g·m^{-2}，而低值区（西北区和青藏高原）的MBE一般在±100 g·m^{-2}以内。

夏季的IWP在北区和南区交界处附近的值最大，高达618 g·m^{-2}；次高值区呈“涡状”分布在西北区西部、青藏高原中部和东部、北区中部和南区西南部。模式在夏季出现严重低估，整个东亚的MBE普遍小于−100 g·m^{-2}。与CF相比，不同的积云参数化方案对IWP的模拟影响较小。由于不同方案对云物理过程的描述不同，而不同季节云的种类、形成机制和演变过程等也不同，因此与年尺度相比，积云方案对模拟结果的影响在季尺度上更明显[27]。

根据IWP在不同区域、不同季节的MBE（图7）可知，不论哪个季节，2种方案在5个子区的MBE均为负值。春季，MBE在东部海域最小，为−242 g·m^{-2}（Emanuel方案）和−237 g·m^{-2}（Mix方案）；在西北区

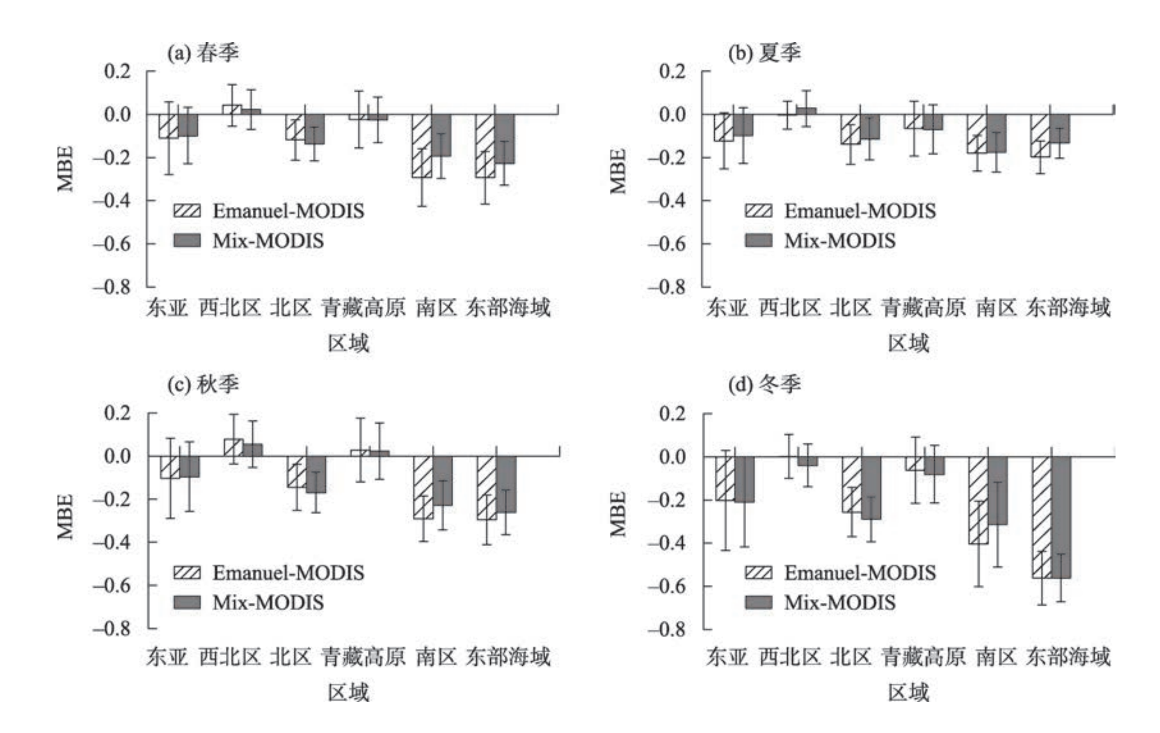


图5 不同季节、不同区域CF的MBE

Fig. 5 MBE of CF in different regions and seasons

表2　Emanuel和Mix方案在东亚的CF模拟结果的季节平均统计量

Tab. 2　Seasonal averaged statistics of simulated CF from Emanuel and Mix schemes in East Asia

季节	Emanuel方案				Mix方案			
	r	MAE	MBE	RMSE	r	MAE	MBE	RMSE
春季	0.358*	0.160	−0.111	0.201	0.358*	0.134	−0.099	0.163
夏季	0.470*	0.141	−0.122	0.178	0.454*	0.130	−0.098	0.162
秋季	0.189*	0.177	−0.104	0.212	0.306*	0.155	−0.096	0.188
冬季	0.116*	0.235	−0.202	0.307	0.161*	0.227	−0.209	0.295

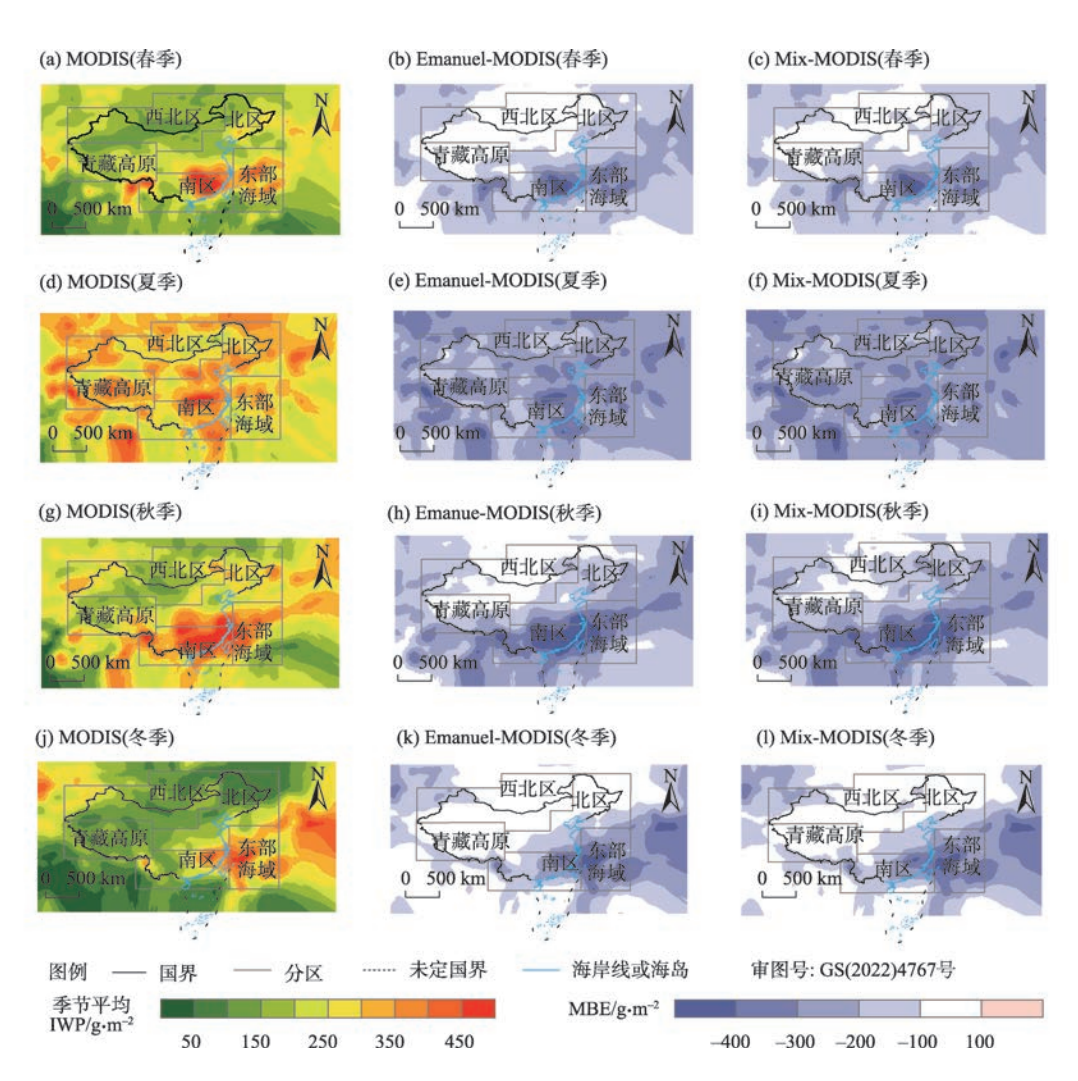


图6　不同季节IWP及其MBE的空间分布

Fig. 6　Spatial distributions of IWP and MBE in different seasons

和青藏高原均大于−100 g·m^{-2}。夏季，2种方案在5个子区的MBE均小于−200 g·m^{-2}，除东部海域外，Mix方案的MBE比Emanuel方案的小10 g·m^{-2}左右。秋季，在南区和东部海域，2种方案的MBE接近；而在西北区、北区和青藏高原，Emanuel方案的MBE比Mix方案的大20 g·m^{-2}左右。冬季，2种方案在各区的MBE的规律与春季的一致，在东部海域为−302 g·m^{-2}；其他区的MBE均大于春季。

Emanuel和Mix方案对东亚IWP模拟结果的季节平均统计量如表3所示。除夏季外，另外3个季节的模拟结果与MODIS呈显著负相关，说明模式不能很好地描述云的次网格过程，从而导致IWP的模

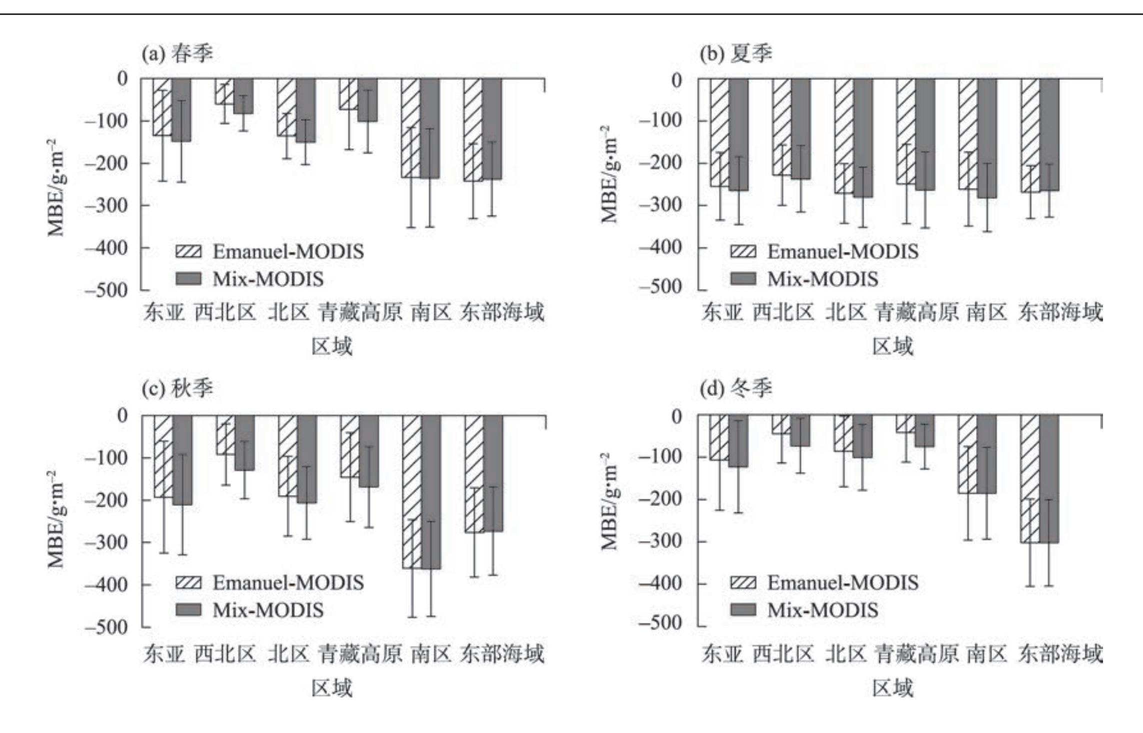


图7 不同季节、不同区域IWP的MBE

Fig. 7 MBE of IWP in different regions and seasons

拟呈现相反的情况。夏季的MAE最大,冬季的最小,结合图6可知,这是由于夏季的IWP普遍较高,而模拟结果以低估为主。积云方案对IWP的模拟效果影响较小,且存在较大的系统误差,说明模式的参数化方案难以准确描述云中冰粒子相关的物理过程,这可能与云冰粒子的大小、不规则形状、散射特性等有关。

3.4 季节平均液水柱含量

由LWP及其MBE的季节平均空间分布可得(图8),春、秋季和冬季东亚的LWP主要呈"西北少、东南多"的特征。春季的LWP较小,集中在50~300 $g·m^{-2}$;冬季的值较大,在西北区北部超过350 $g·m^{-2}$,南区东北部和东部海域西部的值为200~300 $g·m^{-2}$,而西北区南部和北区北部的值一般小于150 $g·m^{-2}$,在40°N附近呈现一个东西向的低值带。夏季,LWP的空间分布较为均匀,呈现"陆地多、海域少"的特点,值大多集中在150~250 $g·m^{-2}$。

在相同季节,Emanuel和Mix方案的MBE空间分布相似,这主要与模式的系统误差和初始场资料有关。在春、夏季和秋季,2种方案模拟的LWP在北区和南区出现不同程度的高估,一般为100~300 $g·m^{-2}$,在青藏高原中部为200 $g·m^{-2}$以内的低估,在另外2个子区的MBE通常在±100 $g·m^{-2}$以内。冬季,模式在西北区北部、北区北部、青藏高原、南区东南部和东部海域均为低估,而其他地区的MBE大多在±100 $g·m^{-2}$以内。整体而言,Mix方案的LWP的MBE比Emanuel方案的更接近于0。

根据LWP在不同区域、不同季节的MBE(图9)可知,对东亚而言,2种方案的MBE在冬季最小,约为−100 $g·m^{-2}$。其他3个季节,东亚的MBE在±50 $g·m^{-2}$

表3 Emanuel和Mix方案在东亚的IWP模拟结果的季节平均统计量

Tab. 3 Seasonal averaged statistics of simulated IWP from Emanuel and Mix schemes in East Asia

季节	Emanuel方案				Mix方案			
	r	MAE/$g·m^{-2}$	MBE/$g·m^{-2}$	RMSE/$g·m^{-2}$	r	MAE/$g·m^{-2}$	MBE/$g·m^{-2}$	RMSE/$g·m^{-2}$
春季	−0.143*	138	−135	172	−0.027	149	−148	177
夏季	0.120*	255	−254	267	0.082*	265	−264	276
秋季	−0.359*	194	−193	234	−0.286*	211	−211	242
冬季	−0.198*	115	−107	160	−0.123*	124	−123	164

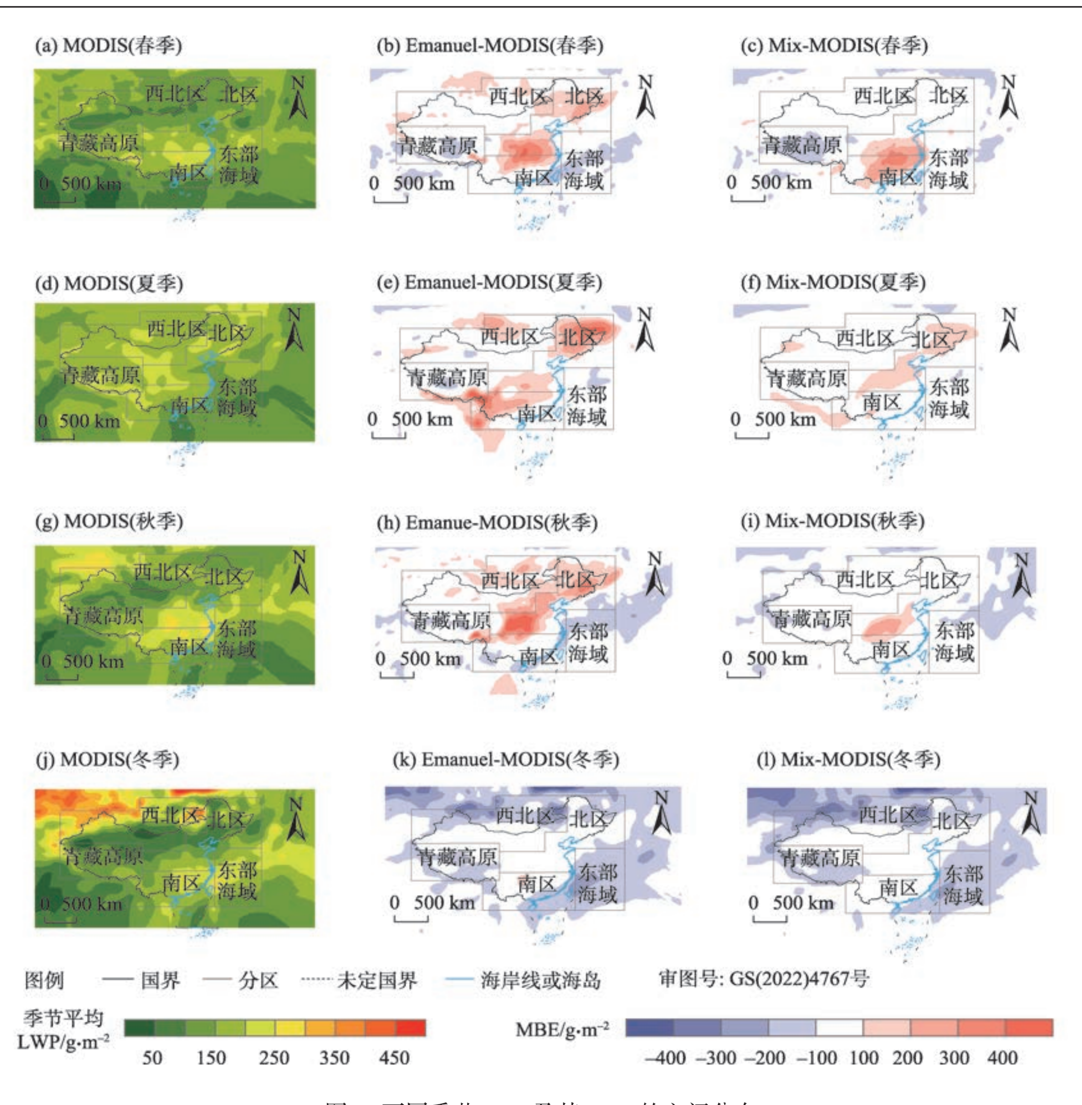


图8　不同季节LWP及其MBE的空间分布

Fig. 8　Spatial distributions of LWP and MBE in different seasons

以内；在西北区和北区，Emanuel方案的MBE约为Mix方案的2倍。春季，在青藏高原和南区，Emanuel方案的MBE更接近于0，这主要是由于正负MBE相互抵消。秋季，Emanuel方案在青藏高原、南区和东部海域均为低估，在北区的MBE最大，为132 g·m^{-2}。

根据模拟的东亚LWP的季节平均统计量（表4）可知，2种方案的r都大于0.3，其中Mix方案在春季和秋季的r超过0.55，大于Emanuel方案；在另外2个季节Emanuel方案的r略大。除冬季外，Mix方案的MAE、MBE和RMSE的绝对值均明显小于Emanuel方案，表明Mix方案对东亚LWP的模拟效果更好。

4　结 论

利用MODIS卫星数据，以东亚为研究区域，初步评估了RegCM4.6中Emanuel和Mix积云参数化方案对CF、IWP和LWP的模拟效果，主要结论如下：

（1）2种方案模拟的CF在东亚西北部约为0.1的高估，在其他地区主要为低估，其中东部海域的MBE小于−0.3。夏季的模拟效果最好，冬季最差。年平均统计量结果表明，Mix方案与MODIS的r为0.152，而Emanuel方案的仅为0.013；不论从年还是季节来看，Mix方案的MAE、MBE和RMSE的绝对值普遍小于Emanuel。

（2）2种方案明显低估了整个东亚的IWP，其中在中国东南部和东部海域的MBE大多小于−200 g·m^{-2}。冬季和春季的模拟结果相对较好，夏季的最差。2种方案在东亚四季的MAE、MBE和RMSE相差在18 g·m^{-2}以内；除夏季外，2种方案模拟的IWP与MODIS的呈显著负相关，这可能是由于模式的参数化方案难以准确描述云中冰粒子的生成、发展和

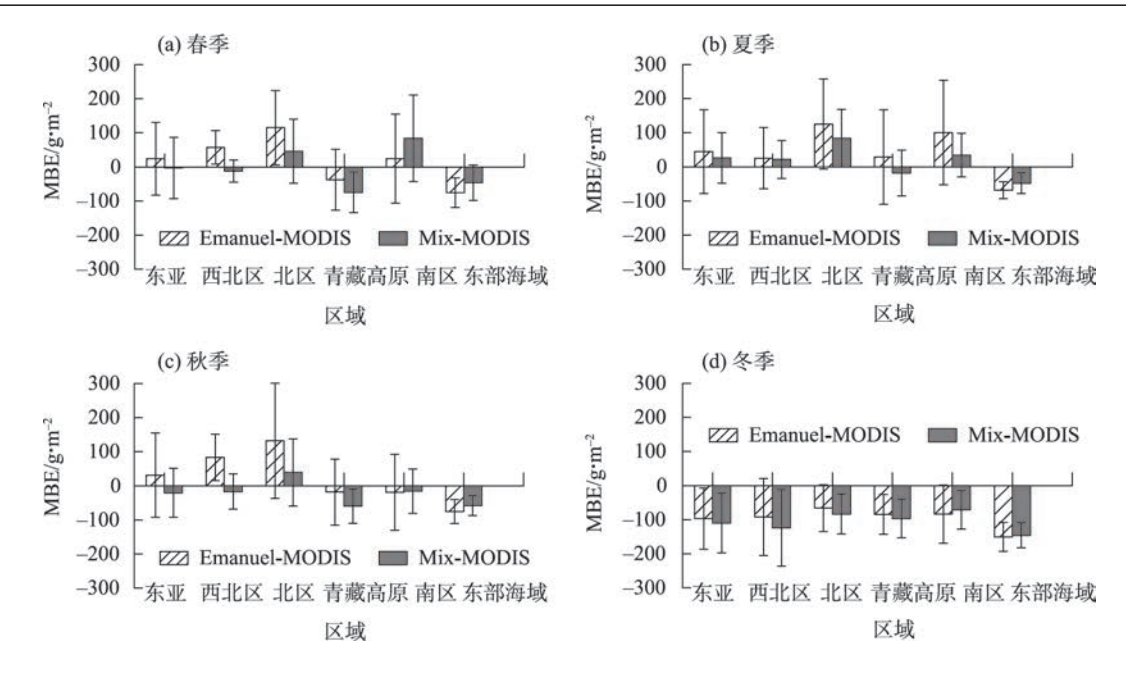


图9 不同季节、不同区域LWP的MBE

Fig. 9 MBE of LWP in different regions and seasons

表4 Emanuel和Mix方案在东亚的LWP模拟结果的季节平均统计量

Tab. 4 Seasonal averaged statistics of simulated LWP from Emanuel and Mix schemes in East Asia

季节	Emanuel方案				Mix方案			
	r	MAE/g·m^{-2}	MBE/g·m^{-2}	RMSE/g·m^{-2}	r	MAE/g·m^{-2}	MBE/g·m^{-2}	RMSE/g·m^{-2}
春季	0.487*	86	24	109	0.572*	65	−3	90
夏季	0.567*	95	45	131	0.464*	60	26	79
秋季	0.480*	97	31	127	0.555*	58	−21	75
冬季	0.339*	106	−97	132	0.308*	111	−110	140

消亡等相关物理过程。

（3）2种方案模拟LWP的MBE在东亚西北部基本在±50 g·m^{-2}以内；在青藏高原和东部海域为−150~50 g·m^{-2}；在其他地区主要是正值，且Mix方案的MBE更小。2种方案模拟的LWP在四季均与MODIS呈显著正相关；冬季模拟效果最差，且以低估为主；其他季节Mix方案的MAE、MBE和RMSE的绝对值均小于Emanuel方案。

综上，使用区域气候模式RegCM4.6研究东亚地区的云水资源时，选择Mix积云参数化方案更合适。

致谢：感谢NASA提供的MODIS数据（https://modis.gsfc.nasa.gov/）。

参考文献（References）

[1] 陈勇航, 邓军英, 张萍, 等. 中天山附近强降雨过程中云冰水含量随高度变化特征[J]. 资源科学, 2013, 35(3): 655−664. [Chen Yonghang, Deng Junying, Zhang Ping, et al. Vertical distribution of ice water content in clouds during heavy rains around Tianshan Mountain[J]. Resources Science, 2013, 35(3): 655−664.]

[2] 张萍, 彭宽军, 陈勇航, 等. 新疆三大山区云的垂直分布特征初探[J]. 资源科学, 2011, 33(11): 2090−2098. [Zhang Ping, Peng Kuanjun, Chen Yonghang, et al. A preliminary study of vertical distribution of clouds over three major mountains in Xinjiang[J]. Resources Science, 2011, 33(11): 2090−2098.]

[3] 张华, 彭杰, 荆现文, 等. 东亚地区云的垂直重叠特性及其对云辐射强迫的影响[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(4): 523−535. [Zhang Hua, Peng Jie, Jing Xianwen, et al. The features of cloud overlapping in Eastern Asia and their effect on cloud radiative forcing[J]. Science China: Earth Sciences, 2013, 43(4): 523−535.]

[4] 王清平, 秦贺, 程海艳, 等. 天山北坡中部一次短时暴雨的卫星反演云参数特征及成因分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(6): 1580−1589. [Wang Qingping, Qin He, Cheng Haiyan, et al. Cloud parameter characteristics of a β-mesoscale short-term rainstorm in the center of the northern slope of Tianshan Mountains[J]. Arid

Land Geography, 2021, 44(6): 1580−1589.]

[5] 张小娟, 王军, 黄观, 等. 新疆3大山区云中液态水时空分布特征[J]. 干旱区研究, 2018, 35(4): 846−854. [Zhang Xiaojuan, Wang Jun, Huang Guan, et al. Spatiotemporal distribution of cloud liquid water volume over three main mountains in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(4): 846−854.]

[6] 王昀, 王旭, 赵笑颜, 等. 新疆层云和层积云冰粒子属性的季节变化[J]. 干旱区地理, 2017, 40(3): 589−597. [Wang Jun, Wang Xu, Zhao Xiaoyan, et al. Seasonal variations of microphysical properties of ice particles for stratus and stratocumulus in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(3): 589−597.]

[7] 孙美平, 史继花, 姚晓军, 等. 冰川下垫面对夏季云结构和云水含量的影响——以祁连山区疏勒南山为例[J]. 干旱区地理, 2021, 44(1): 141−148. [Sun Meiping, Shi Jihua, Yao Xiaojun, et al. Effects of glacial surface on cloud structure and cloud water content in summer: A case study of the Shulenan Mountain of Qilian Mountains[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(1): 141−148.]

[8] 郑倩, 郑有飞, 王立稳, 等. 基于MODIS和CloudSat的京津冀降水冰云季节分布特征[J]. 干旱区地理, 2020, 43(6): 1446−1455. [Zheng Qian, Zheng Youfei, Wang Liwen, et al. Seasonal distribution characteristics of precipitating ice clouds in Beijing-Tianjin-Hebei region based on MODIS and Cloudsat[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(6): 1446−1455.]

[9] Liu X, Kang Y M, Liu Q, et al. Evaluation of net shortwave radiation over China with a regional climate model[J]. Climate Research, 2020, 80(2): 147−163.

[10] 刘鸿波, 张大林, 王斌. 区域气候模拟研究及其应用进展[J]. 气候与环境研究, 2006, 11(5): 649−668. [Liu Hongbo, Zhang Dalin, Wang Bin. Recent advances in regional climate modeling and applications[J]. Climatic and Environmental Research, 2006, 11(5): 649−668.]

[11] 吴婕, 高学杰, 徐影. RegCM4模式对雄安及周边区域气候变化的集合预估[J]. 大气科学, 2018, 42(3): 696−705. [Wu Jie, Gao Xuejie, Xu Ying. Climate change projection over Xiong' an District and its adjacent areas: An ensemble of RegCM4 simulations[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2018, 42(3): 696−705.]

[12] 王政琪, 高学杰, 童尧, 等. 新疆地区未来气候变化的区域气候模式集合预估[J]. 大气科学, 2021, 45(2): 407−423. [Wang Zhengqi, Gao Xuejie, Tong Yao, et al. Future climate change projection over Xinjiang based on an ensemble of regional climate model simulations[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2021, 45(2): 407−423.]

[13] 张冬峰, 高学杰. 中国21世纪气候变化的RegCM4多模拟集合预估[J]. 科学通报, 2020, 65(23): 2516−2526. [Zhang Dongfeng, Gao Xuejie. Climate change of the 21st century over China from the ensemble of RegCM4 simulations[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(23): 2516−2526.]

[14] 高学杰, 石英, 张冬峰, 等. RegCM3对21世纪中国区域气候变化的高分辨率模拟[J]. 科学通报, 2012, 57(5): 374−381. [Gao Xuejie, Shi Ying, Zhang Dongfeng, et al. Climate change in China in the 21st century as simulated by a high resolution regional climate model[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(5): 374−381.]

[15] 赵勇, 房永杰, 黄有志. RegCM3模式对新疆1996年降水和气温的数值模拟分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2012, 6(4): 38−43. [Zhao Yong, Fang Yongjie, Huang Youzhi. The numerical simulation analysis of precipitation and air temperature in Xinjiang in 1996 by regional climate model[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2012, 6(4): 38−43.]

[16] Martínez C D, Vichot L A, Bezanilla M A, et al. The performance of RegCM4 over the central America and Caribbean region using different cumulus parameterizations[J]. Climate Dynamics, 2018, 50: 4103−4126.

[17] Gao X J, Shi Y, Han Z Y, et al. Performance of RegCM4 over major river basins in China[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2017, 34(4): 441−55.

[18] Chow K C, Chan J C L, Pal J S, et al. Convection suppression criteria applied to the MIT cumulus parameterization scheme for simulating the Asian summer monsoon[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(24): L24709, doi: 10.1029/2006GL028026.

[19] Elguindi N, Bi X Q, Giorgi F, et al. Regional climate model RegCM reference manual version 4.6[M]. Trieste, Italy: The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, 2014: 25−27.

[20] Grell G A, Dudhia J, Stauffer D R. A description of the fifth generation Penn State/MCAR mesoscale model (MM5)[R]. Boulder: National Center for Atmospheric Research, 1994.

[21] 赵济. 中国自然地理[M]. 北京: 高等教育出版社, 1995. [Zhao Ji. Physical geography of China[M]. Beijing: Higher Education Press, 1995.]

[22] Li Z, Cribb M C, Chang F L, et al. Validation of MODIS-retrieved cloud fractions using whole sky imager measurements at the three ARM sites[C]//Fourteenth ARM Science Team Meeting Proceedings. Albuquerque, New Mexico, 2004.

[23] King M D, Platnick S, Menzel W P, et al. Spatial and temporal distribution of clouds observed by MODIS onboard the Terra and Aqua satellites[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(7): 3826−3852.

[24] Fritsch J M, Chappell C F. Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems. Part I: Convective parameterization[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1980, 37: 1722−1733.

[25] Emanuel K A, Zivkovic-Rothman M. Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1999, 56: 1766−1782.

[26] 韩振宇, 王宇星, 聂羽. RegCM4对中国东部区域气候模拟的辐射收支分析[J]. 大气科学学报, 2016, 39(5): 683−691. [Han

Zhenyu, Wang Yuxing, Nie Yu. The radiation budget in a regional climate simulation by RegCM4 for eastern China[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2016, 39(5): 683-691.]

[27] 王澄海, 余莲. 区域气候模式对不同的积云参数化方案在青藏高原地区气候模拟中的敏感性研究[J]. 大气科学, 2011, 35(6): 1132-1144. [Wang Chenghai, Yu Lian. Sensitivity of regional climate model to different cumulus parameterization schemes in simulation of Tibetan Plateau climate[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2011, 35(6): 1132-1144.]

[28] Bauer P, Thorpe A, Brunet G. The quiet revolution of numerical weather prediction[J]. Nature, 2015, 525(7567): 47-55.

[29] 贾海灵, 马晓燕, 熊飞麟. 中国东部大陆和邻近海域暖云特性时空分布及其与气象条件的关系[J]. 气候与环境研究, 2018, 23(6): 737-748. [Jia Hailing, Ma Xiaoyan, Xiong Feilin. Spatial and temporal distributions of warm cloud properties in eastern China and its adjacent ocean and their relationships with meteorological conditions[J]. Climatic and Environmental Research, 2018, 23(6): 737-748.]

[30] 汪会, 罗亚丽, 张人禾. 用CloudSat/CALIPSO资料分析亚洲季风区和青藏高原地区云的季节变化特征[J]. 大气科学, 2011, 35(6): 1117-1131. [Wang Hui, Luo Yali, Zhang Renhe. Analyzing seasonal variation of clouds over the Asian monsoon regions and the Tibetan Plateau region using CloudSat/CALIPSO data[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2011, 35(6): 1117-1131.]

[31] 司钰文, 郑宁, 杨洪海, 等. 东亚单层低云特性及其短波辐射强迫的季节变化[J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 37-45. [Si Yuwen, Zheng Ning, Yang Honghai, et al. Seasonal variation of single-layer low cloud physical properties and radiative forcing in East Asia [J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 37-45.]

[32] 李荔珊, 胡轶佳, 钟中, 等. 积云参数化方案对夏季东亚季风区海气系统位相关系模拟的影响[J]. 气象科学, 2016, 36(3): 329-339. [Li Lishan, Hu Yijia, Zhong Zhong, et al. Influence of cumulus parameterization scheme on the simulation of the air-sea system phase relation in East Asia summer monsoon region[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2016, 36(3): 329-339.]

[33] 鞠丽霞, 王会军. 用全球大气环流模式嵌套区域气候模式模拟东亚现代气候[J]. 地球物理学报, 2006, 49(1): 52-60. [Ju Lixia, Wang Huijun. Modern climate over East Asia simulated by a regional climate model nested in a global gridpoint general circulation model [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(1): 52-60.]

[34] Zou L W, Qian Y, Zhou T J, et al. Parameter tuning and calibration of RegCM3 with MIT-Emanuel cumulus parameterization scheme over CORDEX East Asia domain[J]. Journal of Climate, 2014, 27(20): 7687-7701.

Evaluation of simulation results from two cumulus parameterization schemes in RegCM4.6 in East Asia

LIU Xin[1], KANG Yanming[1], XIN Yu[2], CHEN Yonghang[1], ZHOU Haijiang[1], QIN Han[1], HE Qing[2], WANG Zhimin[3]

(1. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. Institute of Desert Meteorology China Meteorological Administration, Urumqi 830002, Xinjiang, China; 3. Weather Modification Office of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830002, Xinjiang, China)

Abstract: Previous studies have shown that the Emanuel scheme performs relatively well in simulating temperature and precipitation in East Asia. However, the user's guide of RegCM4.6 points out that the Emanuel scheme tends to produce excessive precipitation over lands, especially in some intense individual precipitation events. In contrast, the Grell scheme tends to produce weak precipitation over tropical oceans. Therefore, the new version of the regional climate model RegCM4.6 has incorporated the Mix cumulus convective parameterization scheme, which means that the Emanuel scheme can be used over oceans and the Grell scheme over land, to compensate for the deficiencies of a single scheme. Previous validation studies have mainly focused on temperature and precipitation, and few studies have been conducted on the Mix scheme. The MODIS product from January 1st, 2016, to December 31st, 2016, was used as a reference to evaluate the simulation results of cloud fraction (CF), ice water path (IWP), and liquid water path (LWP) in East Asia from the Emanuel and Mix schemes in RegCM4.6 at various time scales. Some statistical parameters were calculated, such as the correlation coefficient (*r*), mean absolute error (MAE), mean bias error (MBE), and root mean square error (RMSE). The results were as follows. (1) The simulated CF were slightly overestimated in the northwest and mainly underestimated in the southeast roughly bounded by the Hu Huanyong line. The performance of the two schemes in simulating CF was the best in summer and the worst in winter. In the four seasons, the absolute values of MAE, MBE, and RMSE of the Mix scheme were generally lower than those of the Emanuel scheme. (2) The systematic deviations of IWP were negative in the whole of East Asia. Except in summer, the IWP from the two simulations and MODIS was significantly negatively correlated in the other three seasons, indicating that it was a challenge to accurately simulate physical processes related to ice particles in the cloud. (3) The LWP was underestimated by the two schemes in the Qinghai Tibet Plateau and Eastern Ocean and was overestimated in southern, central, and northern China, but the annual MBE of the Mix scheme were closer to 0. The performances of the two schemes were similar in winter. In the other three seasons, the absolute values of MAE, MBE, and RMSE of the Mix scheme were less than those of the Emanuel scheme, and the differences in MAE for the two schemes were 21–39 $g \cdot m^{-2}$. In conclusion, the Mix scheme is more suitable to simulate cloud water resources in East Asia. This study will contribute to the exploitation of cloud water resources in East Asia and provide a reference for the selection and improvement of the cumulus convection parameterization scheme in a regional climate model.

Key words: regional climate model; East Asia; cloud fraction; ice water path; liquid water path